

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2021.05.010

CO₂+O₂ 地浸采铀工艺对含矿层渗透性的影响

袁新,刘金辉,周义朋,何挺,陈鑫睿,张一诺

(东华理工大学核资源与环境国家重点实验室,南昌 330013)

摘要:CO₂+O₂ 地浸采铀工艺是一种适合较高碳酸盐含量含矿层地层的技术方法,在该工艺生产过程中会产生不同类型的堵塞,从而降低矿层渗透性。对影响渗透性的矿物因素,碳酸盐矿物、黏土矿物、铁矿物等化学堵塞因素进行了系统分析,认为碳酸盐和黏土矿物以及 CO₂+O₂ 地浸过程中的化学堵塞是影响含矿层渗透性的主要因素。

关键词:地浸采铀;CO₂+O₂;渗透性;矿物;化学堵塞;黏土

中图分类号:TL212.1⁺2 **文献标志码:**A **文章编号:**1007-7545(2021)05-0050-08

Effect of CO₂+O₂ In-situ Leaching of Uranium on Permeability of Ore-bearing Layer

YUAN Xin, LIU Jin-hui, ZHOU Yi-peng, HE Ting, CHEN Xin-rui, ZHANG Yi-nuo

(State Key Laboratory of Uranium Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: CO₂+O₂ in-situ leaching of uranium is a method fitting high carbonate in uranium-bearing layer. Different kinds of clogging occurring during production drop permeability of ore deposit. Factors affecting permeability are analyzed, including mineral and chemical clogging, such as carbonate, iron, and clay. Carbonate mineral and clay mineral, as well as chemical clogging during CO₂+O₂ in-situ leaching, play a critical role in layer permeability.

Key words: in-situ leaching of uranium; CO₂+O₂; permeability; mineral; chemical clogging; clay

地浸采铀是指在天然埋藏之下,通过向砂岩型铀矿层注入溶浸液与矿石发生化学反应使铀溶解,将含铀溶液提升至地表进行水冶回收的一种开采工艺^[1]。我国地浸矿山产能占天然铀总产能的70%以上(2017年)^[2]。CO₂+O₂是一种适用于高碳酸盐的地浸采铀工艺,美国是最早将该工艺应用于工业生产的国家,随着新疆、内蒙古两个CO₂+O₂地浸采铀矿山的建成投产,我国成为继美国之后第二个成功掌握CO₂+O₂地浸采铀技术并工业化应用的国家^[3]。

相对酸法和碱法,CO₂+O₂工艺具有试剂消耗

少、环境污染小和地下水容易修复等优点^[4],但仍存在矿床低渗透性和浸出过程中堵塞引起生产效率降低的问题。采用CO₂+O₂地浸采铀工艺的内蒙古松辽盆地、鄂尔多斯盆地和新疆伊犁盆地的某些矿床在实际生产过程中普遍出现注液压力上升,抽注液能力下降的问题,初步判定为含矿层渗透性降低所致,成为制约铀产能的重要因素。采用CO₂+O₂地浸采铀工艺导致含矿层渗透性降低的原因和机理及其主要影响因素是值得研究的。张鑫等^[5]、史文革等^[6]、李宏星等^[7]、张晓等^[8]和廖文胜等^[9]等从岩石矿物学进行了矿床渗透性研究;吉宏斌等^[10]、张

收稿日期:2020-12-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1967209,42072285)

作者简介:袁新(1993-),男,河南南阳人,博士研究生;通信作者:刘金辉(1961-),男,江西抚州人,教授,博士生导师

勇等^[11]、原渊等^[12]、许根福^[13]、焦学然等^[14]等从溶浸水文学地质学角度探讨了铀浸出过程中的堵塞问题。本文在系统收集相关文献和资料的基础上,通过综合分析,对 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸工艺条件下含矿层渗透性的影响因素进行探讨。

1 矿物对渗透性的影响

赋存于含矿层中的矿物在溶浸液作用下会产生某些次生矿物,导致含矿层堵塞。要研究矿物对矿床渗透性的影响,首先要了解与铀矿共、伴生的矿物类型及其赋存特征。

松辽盆地北部铀矿床以铀石和沥青铀矿为主,与黄铁矿、长石、石英共生,主要存在于碎屑颗粒或裂隙中,或胶结物中^[15]。贾俊民等^[16]研究发现,松辽盆地铀矿床碳酸盐胶结物包括白云石、菱铁矿、铁白云石、方解石,其中铁白云石属于铀矿床期产物与铀成矿密切相关,方解石为成矿期后的产物。内蒙古某铀矿床铀的主要存在形式是铀矿物、吸附铀和含铀矿物,其中吸附态铀主要为有机质和黏土吸附^[17]。杨晓勇等^[18]研究发现,鄂尔多斯盆地东胜—黄龙地区砂岩型铀矿床铀矿物以铀石为主,以吸附态赋存在钾长石、微斜长石、云母、石英、方解石和含铁胶结物中。田成等^[19]对鄂尔多斯盆地南部砂岩铀矿研究发现,成岩晚期胶结物方解石晶出过程伴随铀的相对富集。张鑫等^[5]等对蒙其古尔矿床砂岩型铀矿赋存状态研究结果表明,铀分布于碎屑颗粒边缘、裂隙部位,或与黄铁矿、炭屑共生。张虎军等^[20]研究蒙其古尔矿床普遍存在后生

蚀变作用,包括褐铁矿化、黄铁矿化、黏土矿化和碳酸盐化,铀矿组成为沥青铀矿和铀石,与黄铁矿和炭屑紧密共生。

史文革等^[6]对某砂岩铀矿进行矿物学研究,结果表明,铀矿物以沥青铀矿为主,分布于填隙物中,部分被黏土、有机质吸附;矿石中黏土-粉砂质、泥质胶结物较高,局部碳酸盐胶结是影响渗透性的重要因素。李宏星等^[7]对某矿床砂岩铀矿石和泥质砂岩铀矿石进行工艺矿物学研究发现,铀石和黏土吸附铀是主要铀矿物类型,黏土矿物是影响孔隙结构和渗透率的主要填隙物,铀含量与黏土含量成正比关系。骆效能等^[21]对纳岭沟铀矿床黏土矿物的研究表明,蒙脱石是黏土矿物中吸附铀的主要载体。张晓等^[8]研究了蒙其古尔铀矿床黏土矿物和铀成矿关系,结果显示黏土矿物会吸附铀成矿,黏土含量和类型影响矿层孔隙度和渗透性。廖文胜等^[9]研究了三个低渗透砂岩矿床岩样,发现方解石和蒙脱石显著降低矿层渗透性(图1),高岭石和绿泥石使矿层渗透性易受伤害,高岭石胶结使孔喉分布均匀、大孔道少,从而渗流能力差。岩心孔隙度为12%时,黏土膨胀率达到100%时,渗透率下降27%;孔隙度越大,渗透率下降率越小(图2)^[22]。

在高碳酸盐含量的铀矿床中,沥青铀矿、铀石和吸附态铀石通常是主要铀矿物类型,主要赋存于泥质胶结、碳酸盐胶结夹杂铀石和吸附于黏土矿物。黏土矿物会减小孔隙,方解石沉淀堵塞孔隙,从而降低含矿层有效孔隙度,是影响砂岩型铀矿床低渗透性的主要矿物。

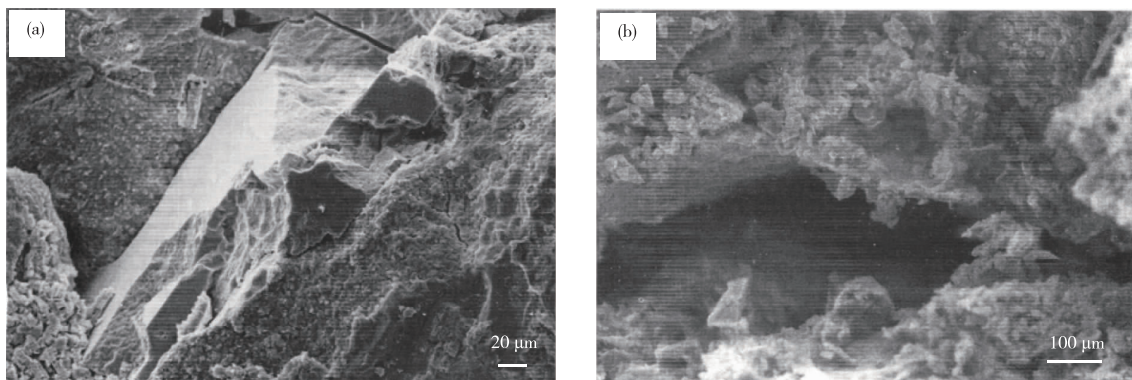


图1 粒间方解石堵塞孔隙(a)和蒙脱石分布于孔隙周围(b)^[9]

Fig. 1 Calcite clogging pore (a) and montmorillonite distributing around the pore (b)^[9]

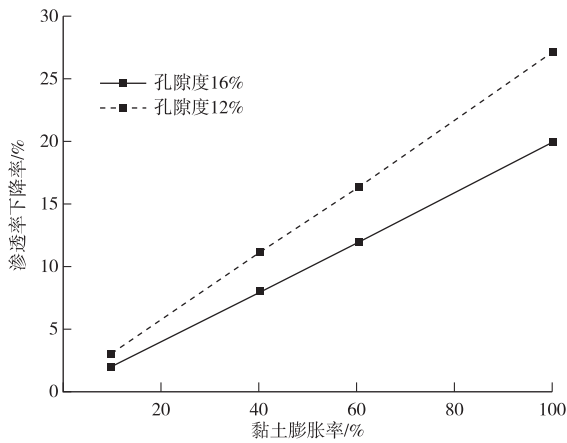


图2 黏土膨胀率对渗透性的影响^[22]

Fig. 2 Effect of clay expansion rate on permeability of clay^[22]

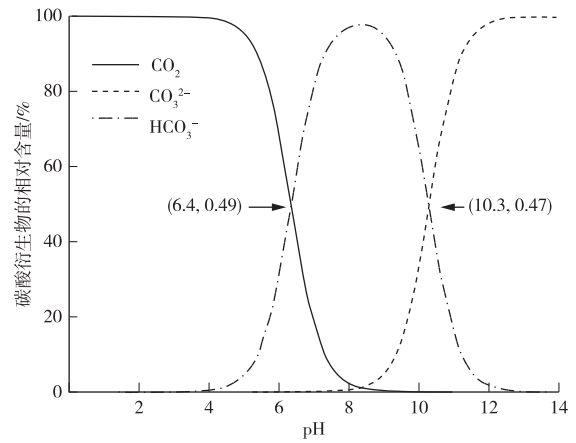


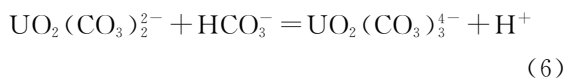
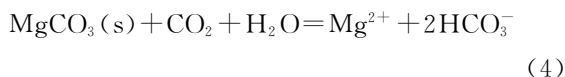
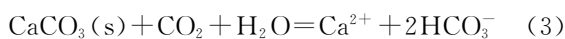
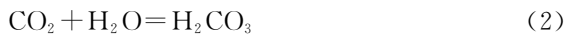
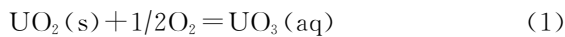
图3 碳酸衍生物相对含量与 pH 的关系

Fig. 3 Relationship between pH value and relative content of carbonic acid derivatives

2 浸出过程中堵塞对渗透性的影响

2.1 CO₂+O₂ 工艺浸铀原理

CO₂+O₂ 工艺浸铀本质上属于碱法工艺,只是浸出环境 pH 介于 6.0 与 7.5,属于中性浸出工艺^[23]。O₂ 作为氧化剂可以氧化矿层中固态四价铀为可溶性六价铀。中性条件下,CO₂ 作为溶浸剂与水或矿层中碳酸盐岩反应生成 HCO₃⁻,与 UO₂²⁺ 反应生成稳定易溶的 UO₂(CO₃)₃⁴⁻ 和 UO₂(CO₃)₂²⁻。相关反应如下:



天然水体中碳的存在形式遵循碳酸平衡原理(如图 3)。在 pH 为 6.0~7.5 时,溶液中碳酸的存在形式以 HCO₃⁻ 为主,几乎不存在 CO₃²⁻。当 pH>7.5 时,水中 HCO₃⁻ 电离生成 CO₃²⁻,CO₃²⁻ 含量升高。由于矿层较高的碳酸盐含量,导致浸出过程中 Ca²⁺ 含量较高,CO₃²⁻ 含量的提高会增加方解石沉淀的可能性。

2.2 化学堵塞

根据堵塞物类型可分为机械堵塞、气体堵塞和化学堵塞等。机械堵塞是由于注液中悬浮颗粒堵塞孔隙造成的,可以采用过滤处理;气体堵塞是由于溶

浸剂中的气体含量过高和不溶气体在孔隙中阻塞液体流动形成的,控制气体量、避免不溶气体、空压机洗孔等手段可以有效控制气体堵塞;化学堵塞产生原因、成分复杂,是溶浸剂与矿物水岩作用的结果,需要采取针对性的措施。

2.2.1 饱和指数

饱和指数(SI)是描述溶液组分饱和程度的重要指标,常被用于判断溶液中矿物溶解沉淀状态。其计算公式为 $SI = \log(IAP/K_{sp})$,其中,IAP 为离子活度积,K_{sp} 为溶度积常数。当 IAP>K_{sp} 时,SI>0,矿物过饱和产生沉淀,反之矿物处于溶解状态,SI=0 表示矿物处于溶解沉淀平衡状态。

2.2.2 碳酸盐堵塞

吉宏斌等^[10]通过 PHREEQCI 软件计算蒙其古尔铀矿床 CO₂+O₂ 工艺浸出液成分,判断产生的堵塞物主要为方解石,会堵塞孔隙,降低矿床渗透性。张勇等^[11]使用 PHREEQCI 在蒙其古尔铀矿床 CaCO₃ 饱和状态研究中发现,CaCO₃ 饱和指数与 pH 呈明显正相关关系。原渊等^[12]认为,影响 CaCO₃ 沉淀的主要因素包括 Ca²⁺、HCO₃⁻ 和 pH,可以使用饱和指数法预测沉淀的发生,计算公式为: $SI = \lg[Ca^{2+}] + \lg[HCO_3^-] + pH - K_{sp}$ 。许根福等^[13]研究化学沉淀堵塞表明,HCO₃⁻ 含量相同的情况下,pH 越高则 CO₃²⁻ 活度也会升高。费子琼等^[24]、祝永进等^[25]通过 PHREEQCI 计算确定了避免方解石沉淀发生的 pH、Ca²⁺、HCO₃⁻ 边界值,可以为浸出工艺参数提供参考。

盐效应可以提高碳酸钙的溶解度,但对于初始地下水矿化度较高的十红滩铀矿床,方解石和石膏

已经处于饱和或过饱和状态,水中 Ca^{2+} 、 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 和 pH 略微升高就会导致严重的化学堵塞,常规酸法和碱法工艺均不能有效浸出铀资源^[26]。焦学然等^[14]在室内用自来水淡化浸出液后进行了浸铀试验,结果显示,混合稀释作用对防止 CaSO_4 沉淀具有良好效果,但不能缓解碳酸钙沉淀产生,而通入 CO_2 则使 CaCO_3 饱和指数从 0.415 1 下降到 -6.946 7,从而有效避免了 CaCO_3 沉淀。陈建昌等^[27]对内蒙古某铀矿进行室内中性浸出试验,矿层水 + O_2 + CO_2 可以避免碳酸钙沉淀。原渊等^[28]针对鄂尔多斯铀矿床中性浸出中 CaCO_3 堵塞问题,通过室内试验和现场试验证明了加入 CO_2 防止矿层堵塞的有效性。新疆和内蒙古的现场试验结果同样验证了 CO_2 可以有效抑制碳酸钙沉淀^[29-30]。

综上所述,pH 是 CaCO_3 溶解沉淀的主要控制因素,保持 pH 在临界范围内可有效避免地浸过程中 CaCO_3 的沉淀。

2.2.3 铁矿物堵塞

薛海凤等^[31]根据离子系数矩阵利用 Matlab 计算活度积并与浓度积常数对比判断沉淀物种类,预测的沉淀物主要是碳酸钙,也有少量铁垢。因为铀矿床中伴生的黄铁矿等含铁矿物被氧化溶解,而 Fe^{3+} 在水中 H^+ 含量较低时($\text{pH} > 2 \sim 3$)易水解产生 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 。 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶体是典型的两性胶体,等电 pH 为 7.1;当溶液 pH 低于胶体等电 pH 时,胶体带正电荷,与含水介质表面所带电荷相反,会堵塞孔隙,降低含水层渗透性^[32]。GÓMEZ 等^[33]在模拟地下水中铀远离矿井运移过程中发现,铀浓度受到 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 控制,产生共沉淀使得地下水中铀浓度快速降低。李坡等^[34]对新疆某矿床酸耗高、铀含量低的原因进行了分析,发现 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 会吸附铀与铀共沉淀并进而影响浸出效率。在 $\text{pH} < 7.1$ 的弱酸环境下, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶体一方面产生沉淀破坏矿层渗透性,又吸附溶液中的铀酰络阴离子^[32],不利于铀的浸出。田新军等^[35]对缓解某矿床碱法浸出中出现的堵塞问题进行了研究,结果显示,溶浸剂中加入 CO_2 调节 $\text{pH} = 6.5 \sim 7$ 可以较好地避免 CaCO_3 的沉淀、避免水针铁矿和 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 形成较大胶体颗粒和减弱附着能力,改善矿层渗透性。

铁离子沉淀也发生在洗孔过程中,解堵剂与含矿岩石的水岩作用产生化学堵塞,同样会伤害矿床渗透性。单一强酸作为解堵剂适用于酸法地浸工艺,但对于 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 浸出工艺效果不好,水岩作用会对矿层产生二次伤害^[36],堵塞物质主要为铁垢。

吉宏斌等^[37]对提高矿层渗透性的研究表明,洗孔时加入铁离子稳定剂可以避免铁离子的二次沉淀,从而缓解或避免堵塞孔隙。

Fe^{3+} 在中性条件下的低溶解度是铁垢产生的主要原因,控制 pH 可以避免水针铁矿和 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 形成较大胶体颗粒,减弱其附着孔隙和管壁的能力,从而缓解堵塞。

2.2.4 硫酸盐堵塞

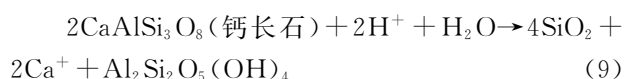
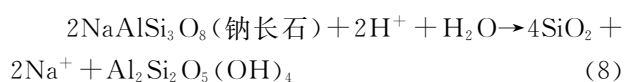
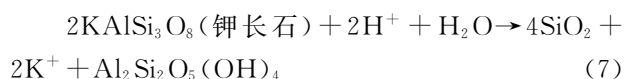
$\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 中性地浸过程中,含硫矿物如黄铁矿,在氧化剂作用下会生成 SO_4^{2-} ,浸出液循环利用致使 SO_4^{2-} 含量累积,当 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 活度积超过溶度积时,石膏过饱和即发生沉淀。类似情况也会发生在微酸中性浸出工艺中^[38]。张青林等^[39]在室内 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 柱浸试验中发现,浸出液 SO_4^{2-} 含量会逐渐提高,虽然未达到石膏饱和状态,但需要时刻关注浸出液的 SO_4^{2-} 和 pH,及时采取必要措施降低石膏沉淀风险。薛海凤等^[40]通过室内试验验证了强酸性苯乙烯系列阳离子交换树脂(001×7)在中性浸出过程中可以去除溶液中的 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} ,有效缓解了 CaCO_3 、 MgCO_3 、 FeCO_3 和 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 的沉淀。

浸出液循环利用是 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 浓度升高的主要原因,要避免石膏沉淀需要控制溶浸剂离子浓度。

2.3 黏土膨胀

黏土矿物包括蒙脱石、绿泥石、高岭石和伊利石等,含量较高会降低矿层渗透性。黏土的水化膨胀是因为晶体间阳离子被置换,晶体表面吸附水分子,形成水化膜,使晶格间距增大。蒙脱石具有很高的表面积,所以膨胀现象更明显^[41]。

长石的黏土化可能是铀矿开采过程中黏土含量增长的主要原因,主要表现为长石的高岭石化,反应式^[42]如 7~9 所示。在不同 pH 条件下,矿物水解产物不同,如白云母($\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$)在 $\text{pH} = 7 \sim 9$ 时生成埃洛石, $\text{pH} = 7 \sim 8.5$ 时会生成蒙脱石^[43]。



$\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸工艺溶浸液 pH 在 6~7.5,溶浸剂中 H_2CO_3 含量不低,可能生长石的高岭石化以

及白云石的蒙脱石化。黏土一方面会缩小孔隙通道,减小矿层渗透性,另一方面,由于其较大的比表面积会吸附铀,不利于铀浸出。砂岩型铀矿床中矿物黏土化不易观察,所以浸出过程中的长石黏土化研究还很少见。

2.4 其他堵塞

在地浸钻孔施工过程中,泥浆会进入含矿含水层堵塞孔隙,降低矿层渗透性。钻孔施工产生的堵塞类型为机械堵塞,对矿层渗透性的影响会发生在所有地浸工艺中。钻孔工艺的改进可以减小钻孔施工对矿层渗透性的破坏。应用清水钻进、负压钻进技术可以保护矿层渗透性,完井后及时洗孔可以适当恢复钻井对渗透性造成的影响^[44]。赵海军等^[45]对改善矿层渗透性研究中指出,用表面活性剂、压缩空气和清水配置的钻井液以较小的密度和小于含矿层地下水的液柱压力,保证了钻进液在钻进过程中不能进入矿层,可以有效保护矿层的渗透性;成井后,合理的洗井方法可以最大限度地修复钻进液对矿层渗透性的破坏。

钻孔施工对矿层渗透性的破坏不可避免,渗透性保护和修复有赖于钻井和成井工艺的提高。

3 结论

在CO₂+O₂地浸采铀过程中,影响矿层渗透性的因素主要包含矿物和堵塞两方面。

1)颗粒间孔隙中的碳酸盐胶结夹杂铀石和黏土吸附铀不仅是铀矿物的主要类型,也是造成孔隙通道缩小和堵塞孔隙的主要原因。

2)化学堵塞是地浸生产过程中产生的主要堵塞类型。堵塞物有碳酸钙、铁垢和硫酸钙。堵塞不仅发生在浸出过程中,也可出现在钻孔施工和洗孔过程中。pH是影响堵塞产生的控制因素。

3)长石的黏土化是矿层中黏土含量增加的重要原因,黏土吸水膨胀破坏矿床渗透性不利于浸出。

参考文献

[1] 张飞凤,苏学斌,邢拥国,等.地浸采铀新工艺综述[J].中国矿业,2012,21(增刊1):9-12.
ZHANG F F, SU X B, XING Y G, et al. New progresses on in-situ leaching of uranium deposit[J]. China Mining Magazine,2012,21(S1):9-12.

[2] 朱学蕊,赵琦.“十三五”地浸采铀占天然铀产能9成以上[EB/OL].中国能源报,2017(12). [2020-10-10].
http://paper.people.com.cn/zgnyb/html/2017-10/16/content_1811129.htm.

ZHU X R, ZHAO Q. In situ leaching of uranium in the 13th five year plan accounts for more than 90% of natural uranium production capacity [EB/OL]. China Energy News,2017(12). [2020-10-10].
http://paper.people.com.cn/zgnyb/html/2017-10/16/content_1811129.htm.

[3] 苏学斌.高效绿色发展推进铀矿大基地建设[J].中国核工业,2016(11):16-19.
SU X B. Efficient green development, advancing the construction of large uranium mining base[J]. China Nuclear Industry,2016(11):16-19.

[4] 朱鹏,陈建昌,尉小龙,等.砂岩型铀矿床地浸采铀工艺方法概述[J].采矿技术,2011,11(4):4-6,92.
ZHU P, CHEN J C, WEI X L, et al. An overview of in-situ leaching uranium mining technology for sandstone-type uranium deposits[J]. Mining Technology, 2011, 11(4):4-6,92.

[5] 张鑫,聂逢君,张成勇,等.伊犁盆地蒙其古尔矿床砂岩型铀矿赋存状态研究[J].科学技术与工程,2015,15(33):18-23,47.
ZHANG X, NIE F J, ZHANG C Y, et al. Study on uranium occurrence state of sandstone-type uranium deposits in Mengqiguer deposit, Yili basin[J]. Science Technology and Engineering,2015,15(33):18-23,47.

[6] 史文革,蔡萍莉,胡凯光.某砂岩铀矿石室内工艺矿物学研究[J].现代矿业,2010,26(8):115-117.
SHI W G, CAI P L, HU K G. Research on indoor technological mineralogy of a sandstone uranium ore[J]. Morden Mining,2010,26(8):115-117.

[7] 李宏星,周根茂,胥国龙,等.某砂岩铀矿床不同岩性铀矿石浸出性能研究[J].铀矿冶,2016,35(2):79-83.
LI H X, ZHOU G M, XU G L, et al. Study on leaching behavior of different uranium ores from a sandstone uranium deposit[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2016,35(2):79-83.

[8] 张晓,李晓翠,秦明宽,等.蒙其古尔铀矿床砂岩中黏土矿物特征及其与铀矿化的关系[J].铀矿地质,2013,29(2):78-85.
ZHANG X, LI X C, QIN M K, et al. Feature of clay minerals in Mengqiguer uranium deposit and its relation to uranium mineralization[J]. Uranium Geology, 2013, 29(2):78-85.

[9] 廖文胜,王立民,姚益轩,等.某低渗透砂岩铀矿层渗透性能损害因素分析[J].金属矿山,2009(增刊1):305-310,323.
LIAO W S, WANG L M, YAO Y X, et al. Impact factors of permeability of low permeable sandstone uranium deposits [J]. Metal Mine, 2009 (S1): 305-310,323.

- [10] 吉宏斌,周义朋,孙占学,等. 蒙古其尔铀矿床 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸浸出过程分析与探讨[J]. 有色金属(冶炼部分), 2018(3):55-59.
JI H B, ZHOU Y P, SUN Z X, et al. Analysis of and discussion on $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ in-situ leaching of uranium process at Mengqiguer deposit[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2018(3):55-59.
- [11] 张勇,周义朋,张青林,等. 蒙古其尔矿床微酸地浸采铀碳酸钙饱和状态研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2014(12): 24-27.
ZHANG Y, ZHOU Y P, ZHANG Q L, et al. Saturation state of calcium carbonate during mild acid in-situ leaching of uranium at Mengqiguer deposit[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2014(12): 24-27.
- [12] 原渊,江国平,廖天伟,等. 地浸采铀碳酸钙结垢主要影响因素研究[J]. 中国矿业, 2019, 28(11):128-130.
YUAN Y, JIANG G P, LIAO T W, et al. Research on main influence factors on calcium carbonate scaling of in-situ leaching process[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(11):128-130.
- [13] 许根福. $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸采铀主要工艺参数及化学沉淀堵塞问题分析[J]. 铀矿冶, 2014, 33(4):197-202, 22.
XU G F. Analysis of the main technological parameters of $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ in situ leaching uranium and problems by chemical precipitation blocking[J]. 2014, 33(4): 197-202, 22.
- [14] 焦学然,张霞,孙占学. 混合淡化解铀矿床地浸开采堵塞问题研究[J]. 矿业研究与开发, 2014, 34(7):5-8.
JIAO X R, ZHANG X, SUN Z X. Sedimentation jamming control in the in-situ leaching of uranium by mixing and desalting method[J]. Mining Research and Development, 2014, 34(7):5-8.
- [15] 汤超,魏佳林,肖鹏,等. 松辽盆地北部砂岩型铀矿铀的赋存状态研究[J]. 矿产与地质, 2017, 31(6): 1009-1016.
TANG C, WEI J L, XIAO P, et al. Research on uranium occurrence state of sandstone-type uranium deposit in the northern Songliao basin [J]. Mineral Resources and Geology, 2017, 31(6):1009-1016.
- [16] 贾俊民,荣辉,焦养泉,等. 松辽盆地钱家店铀矿床中碳酸盐胶结物赋存状态及其与铀成矿关系[J]. 地球科学, 2018, 43(增刊 2):149-161.
JIA J M, RONG H, JIAO Y Q, et al. Occurrence of carbonate cements and relationship between carbonate cementation and uranium mineralization of Qianjiadian uranium deposit, Songliao basin [J]. Earth Science, 2018, 43(S2):149-161.
- [17] 闫纪帆,张渤,刘佳斌,等. 某 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸采铀矿山采区浸出效果研究[J]. 铀矿冶, 2020, 39(3):185-190.
YAN J F, ZHANG B, LIU J B, et al. Study on leaching effect of in-situ leaching uranium mine by $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2020, 39(3): 185-190.
- [18] 杨晓勇,凌明星,赖小东,等. 鄂尔多斯盆地东胜—黄龙地区砂岩型铀矿铀矿物赋存状态研究[J]. 地质学报, 2009, 83(8):1167-1177.
YANG X Y, LING M X, LAI X D, et al. Uranium mineral occurrence of sandstone-type uranium deposits in the Dongsheng—Huanglong region, Ordos basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(8):1167-1177.
- [19] 田成,贾立城,李松,等. 鄂尔多斯盆地南部含铀砂岩岩石学特征研究[J]. 铀矿地质, 2007, 23(2):71-76.
TIAN C, JIA L C, LI S, et al. Study of petrological characteristics of uranium bearing sandstone in the south of Ordos basin, China [J]. Uranium Geology, 2007, 23(2):71-76.
- [20] 张虎军,聂逢君,饶明辉,等. 伊犁盆地蒙古其尔地区水西沟群砂岩型铀矿目的层岩石学特征及其意义[J]. 地质与勘探, 2012, 48(1):132-139.
ZHANG H J, NIE F J, RAO M H, et al. Lithology characteristics of the uranium-bearing sandstone in the Shuixigou Group in the Mengqiguer area of the Yili basin and their implications[J]. Geology and Exploration, 2012, 48(1):132-139.
- [21] 骆效能,李子颖,张玉燕,等. 鄂尔多斯盆地东北部纳岭沟铀矿床黏土矿物特征[J]. 铀矿地质, 2019, 35(2): 65-72.
LUO X N, LI Z Y, ZHANG Y Y, et al. Characteristics of clay minerals in Nalinggou uranium deposit, northeastern Ordos basin [J]. Uranium Geology, 2019, 35(2):65-72.
- [22] 姜岩,廖文胜,江国平,等. 某低渗透砂岩铀矿层渗流特征分析[J]. 铀矿冶, 2016, 35(1):31-38.
JIANG Y, LIAO W S, JIANG G P, et al. Analysis of seepage characteristics of one low permeable sandstone uranium deposit [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2016, 35(1):31-38.
- [23] 周义朋,沈照理,史维浚,等. 地浸采铀工艺分类方法的探讨[J]. 有色金属(冶炼部分), 2015(1):37-41.
ZHOU Y P, SHEN Z L, SHI W J, et al. Discussion on technology classification of in-situ leaching uranium mining [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2015(1):37-41.
- [24] 费子琼,周义朋,张勇,等. 某矿床地浸采铀现场试验过程中的水化学状态分析[C]//中国核学会 2015 年学术

- 年会论文集第1册(铀矿地质分卷、铀矿冶分卷). 四川绵阳:中国核学会,2015:65-71.
- FEI Z Q,ZHOU Y P,ZHANG Y, et al. Hydrochemical state analysis of in-situ leaching of uranium in a deposit[C]//Proceedings of the 2015 annual academic meeting of the Chinese Nuclear Society; Volume 1 (Uranium geology sub volume, Uranium mining and metallurgy sub volume). Mianyang: Chinese Nuclear Society, 2015: 65-71.
- [25] 祝永进,史维浚,孙占学,等. 弱酸-中-弱碱性介质中的水-碳酸钙作用——砂岩铀矿地浸过程中碳酸钙堵塞机理及其预防[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2010,33(4):369-373.
- ZHU Y J,SHI W J,SUN Z X, et al. The water-calcite reaction in weak acid-neutral-weak alkality media: The mechanism of block-up by carbonate in leaching and its protect [J]. Journal of East China Institute of Technology (Natural Science Edition), 2010, 33 (4): 369-373.
- [26] 高柏,杜洋,孙占学,等. 十红滩砂岩型铀矿床南段地浸条件分析[J]. 中国矿业,2013,22(6):89-92.
- GAO B,DU Y,SUN Z X, et al. Analyzed the conditions of leaching uranium in south area of Shihongtan uranium deposit[J]. China Mining Magazine, 2013, 22 (6):89-92.
- [27] 陈建昌,朱鹏,徐巧兵,等. 内蒙古某铀矿床室内中性浸出试验研究[J]. 铀矿冶,2013,32(2):72-75.
- CHEN J C,ZHU P,XU Q B, et al. Laboratory test of neutral leaching of a uranium ore in Inner Mongolia[J]. Uranium Mining and Metallurgy,2013,32(2):72-75.
- [28] 原渊,邓锦勋,江国平,等. 某铀矿床地浸试验注液井堵塞的形成原因与解决措施[C]//中国核学会 2017 年学术年会论文集第 2 册(铀矿地质分卷(下)、铀矿冶分卷). 山东威海:中国核学会,2017:237-243.
- YUAN Y,DENG J X,JIANG G P, et al. Causes and solutions of plugging of injection wells in in-situ leaching test of a uranium deposit[C]//Proceedings of the 2017 annual academic meeting of the Chinese Nuclear Society; Volume 2 (Uranium geology sub volume; Part 2, Uranium mining and metallurgy sub volume). Weihai: Chinese Nuclear Society, 2017: 237-243.
- [29] 苏学斌,韩青涛,谭亚辉,等. 新疆某铀矿床 CO₂ 地浸采铀试验研究[J]. 铀矿冶,2005,24(3):129-134.
- SU X B,HAN Q T,TAN Y H, et al. A experiment of in situ leaching of uranium with CO₂ [J]. Uranium Mining and Metallurgy,2005,24(3):129-134.
- [30] 王海波,牛奔,杨敬,等. 内蒙古某砂岩型铀矿地浸试验的影响因素探究[C]//中国核学会 2015 年学术年会论文集第 1 册(铀矿地质分卷、铀矿冶分卷). 四川绵阳:中国核学会,2015:202-206.
- WANG H B, NIU B, YANG J, et al. Factors influencing in-situ leaching test of a sandstone type uranium deposit in Inner Mongolia[C]//Proceedings of the 2015 annual academic meeting of the Chinese Nuclear Society; Volume 1 (Uranium geology sub volume, Uranium mining and metallurgy sub volume). Mianyang: Chinese Nuclear Society, 2015:202-206.
- [31] 薛海凤,朱建华,刘红研,等. 前二块铀矿床采铀注液结垢趋势的理论分析与预测[J]. 铀矿地质,2008,24(1):48-56,64.
- XUE H F, ZHU J H, LIU H Y, et al. Theoretical analysis and prediction of the scaling trend of the in-situ leaching injection lixiviate in Qianerkuai uranium deposit[J]. Uranium Geology,2008,24(1):48-56,64.
- [32] 史维浚. 铀水文地球化学原理[M]. 北京:原子能出版社,1990.
- SHI W J. Hydrogeochemical Principles of Uranium[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1990.
- [33] GÓMEZ P, GARRALÓN A, BUIL B, et al. Modeling of geochemical processes related to uranium mobilization in the groundwater of a uranium mine[J]. Science of the Total Environment,2006,366(1):295-309.
- [34] 李坡,刘国宏,段柏山,等. 新疆某矿床酸耗高、浸出液铀浓度低的原因分析[J]. 铀矿冶,2018,37(1):26-31.
- LI P, LIU G H, DUAN B S, et al. Analysis on the problems of high acid consumption and low concentration of uranium in a deposit in Xinjiang[J]. Uranium Mining and Metallurgy,2018,37(1):26-31.
- [35] 田新军,沈红伟,陈雪莲,等. 用二氧化碳减缓碱法地浸采铀中的化学沉淀堵塞[J]. 铀矿冶,2006,25(1):15-20.
- TIAN X J, SHEN H W, CHEN X L, et al. Using CO₂ for reducing chemical precipitation jamming in alkaline in-situ leaching of uranium [J]. Uranium Mining and Metallurgy,2006,25(1):15-20.
- [36] 杜超超,周义朋. CO₂ + O₂ 地浸采铀矿层渗透性影响因素[J]. 有色金属(冶炼部分),2019(7):48-53.
- DU C C, ZHOU Y P. Influence factors on permeability of ore layer in uranium CO₂ + O₂ in-situ leaching [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2019(7): 48-53.
- [37] 吉宏斌,阳奕汉,孙占学,等. 地浸采铀过程中的矿层解堵增渗技术及现场应用[J]. 湿法冶金,2017,36(1):143-147.
- JI H B, YANG Y H, SUN Z X, et al. Technology on

- removing blockage and increasing permeability of ore layer and its production application[J]. *Hydrometallurgy of China*, 2017, 36(1): 143-147.
- [38] 张勇, 周义朋, 黄群英, 等. 高碳酸盐型铀矿床微酸中性地浸采铀试验[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2016(2): 33-37.
ZHANG Y, ZHOU Y P, HUANG Q Y, et al. Low acid neutral in-situ leaching of uranium mining with high content of carbonates uranium deposit[J]. *Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy)*, 2016(2): 33-37.
- [39] 张青林, 丁德馨. 某砂岩铀矿床 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 柱浸试验[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2017(8): 35-39.
ZHANG Q L, DING D X. $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ column leaching test of sandstone type uranium ore[J]. *Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy)*, 2017(8): 35-39.
- [40] 薛海凤, 朱建华, 武本成, 等. 钱二块铀矿地浸采铀离子交换法防堵技术研究[J]. *铀矿冶*, 2009, 28(2): 66-69.
XUE H F, ZHU J H, WU B C, et al. Ion exchange blinding-preventing technique of in-situ uranium leaching in Qianerkuai uranium deposit[J]. *Uranium Mining and Metallurgy*, 2009, 28(2): 66-69.
- [41] 张星, 毕义泉, 汪庐山, 等. 黏土矿物膨胀机理及防膨研究现状[J]. *精细石油化工进展*, 2014, 15(5): 39-43.
ZHANG X, BI Y Q, WANG L S, et al. Research status on swelling mechanism and anti-swelling of clay mineral[J]. *Advances in Fine Petrochemicals*, 2014, 15(5): 39-43.
- [42] 丁波, 刘红旭, 李平, 等. 伊犁盆地蒙古古尔铀矿床含矿砂岩成岩蚀变特征及其有机-无机流体成岩成矿效应[J]. *地质论评*, 2018, 64(1): 149-164.
DING B, LIU H X, LI P, et al. The feature of diagenetic alteration of ore-bearing sandstone in Mengqiguer uranium deposits, Yili basin, and the effect of diagenetic and mineralization of its organic-inorganic fluid[J]. *Geological Review*, 2018, 64(1): 149-164.
- [43] 韩吟文, 马振东. *地球化学* [M]. 北京: 地质出版社, 2003.
HAN Y W, MA Z D. *Geochemistry* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003.
- [44] 李晓剑, 姜岩, 姚益轩, 等. 提高地浸采铀钻孔涌水量的技术措施及其应用[J]. *铀矿冶*, 2010, 29(2): 57-60, 69.
LI X J, JIANG Y, YAO Y X, et al. Technical measures of reinforcing the discharge of in-situ leaching drill holes and applications [J]. *Uranium Mining and Metallurgy*, 2010, 29(2): 57-60, 69.
- [45] 赵海军. 某低渗透性铀矿床改善含矿层渗透性方法研究[C]//中国核学会 2013 年学术年会论文集第 2 册(铀矿冶分卷, 核能动力分卷(上)). 哈尔滨: 中国核学会, 2013: 214-218.
ZHAO H J. Study on improving the permeability of ore bearing bed in a low permeability uranium deposit[C]// Proceedings of the 2013 annual academic meeting of the Chinese Nuclear Society: Volume 2 (Uranium mining and metallurgy sub volume, Nuclear power sub volume: Part 1). Harbin: Chinese Nuclear Society, 2013: 214-218.